

# РЕЗУЛТАТИ ОТ МЕТАЛОГРАФСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗЛИ НА ЗАВАРЯВАНЕ НА КОЛЕКТОРИ КЪМ ПАРОГЕНЕРАТОРИ В АТОМНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

Петко Кънчев  
Технически университет  
София, България  
pmk@abv.bg

Галя Димова  
Технически университет  
София, България  
gtdimova@abv.bg

**Резюме:** Този доклад представя резултати от металографско изследване на възли на заваряване на колектори към парогенератори в няколко атомни централи. Разгледани са работните условия на обектите и механизмите на деградация на механични свойства на метала. Резултатите описват наблюденията по възникването и развитието на дефектите в метала на заварените съединения. Периодът на изследването е 30 години.

**Ключови думи:** атомни централи, парогенератори, металография, дефекти

## I. УВОД

През първите десетилетия на XXI-ви век човечеството експлоатира много високоотговорни съоръжения, компоненти и системи, които са в края на своя проектен срок, или са в условията на продължен експлоатационен срок на атомните централи.

Продължаването на експлоатацията на съоръженията става след положителни резултати от проведени контрол и изпитване, изследвания и анализи за тяхната работоспособност. Този въпрос е особено актуален за енергоблоковете в повечето атомни централи, поради високите норми и изискванията на институциите, както и очакванията на обществото за нивото на тяхната безопасна експлоатация. Към 2017 г. от всичките експлоатирани атомни централи в света, 79 са експлоатирани повече от 40 години, а други 182 са експлоатирани повече от 30 години [1], Фиг. 1.

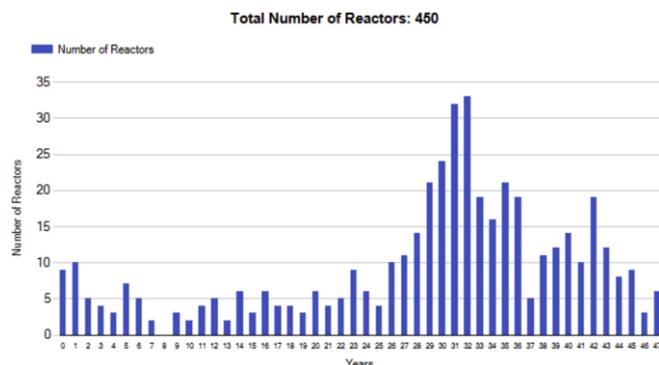


Fig. 1 Брой на реактори / години на експлоатация

Известни са механизмите на деградация на механични свойства на метала, типични за атомните установки [2]. Но все още не е изучен синергичния ефект от взаимодействието на много въздействащи фактори. Оказва се, че под влияние на работните условия и след 35-40 години експлоатация в повечето използвани метали на съоръженията са налице зони с повишен потенциал за разрушаване на метала.

При експлоатацията на атомни централи от типа ВВЕР 1000 са констатирани структурни дефекти в някои от възлите на заваряване на колекторите с корпуси на парогенератори, тип ПГВ 1000М [3,4]. За такива дефекти се докладва от няколко атомни централи. Необходимо е да се провеждат металографски изследвания на метала на възлите на заваряване на паровите колектори към корпусите на парогенераторите. Изследването на метала в тези зони се извършва периодично и в експлоатационен порядък чрез методите на безразрушителен контрол на метала – визуален, капиларен и ултразвуков. Фрактографски изследвания на метала се провеждат, като се извършват разрези на възлите на заваряване и се изследват темплетите.

Изследванията на метала в тези зони са значими, защото се получават статистически металографски данни, необходими за безопасната експлоатация на ядрения блок. При продължаване срока на експлоатация на реакторната установка е необходимо да се провеждат якостни разчети, за които се използват данни за състоянието на метала.

## II. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

### A. Конструктивна част

Парогенераторът от типа ПГВ-1000М е част от реакторна установка ВВЕР 1000 и представлява хоризонтален изпарител с потопяем U-образен тръбен сноп от топлообменни тръбички, Фиг. 2. Корпусът на парогенератора е цилиндричен съд с вътрешен диаметър 400 см, с две елиптични дъна. Цилиндричната част на корпуса на парогенератора се състои от централен пръстен и два странични пръстени. В долната част на централния пръстен са заварени два щуцера с диаметър Ду 1200 (диаметър условен) за присъединяване на колекторите на топлоносителя по първи контур („горещ“ и „студен“ щуцер/колектор). В горната част на

централния пръстен са заварени два люка Ду 800 за обслужване на колекторите, също така тук са разположени 10 щуцери за отвеждане на парата, които посредством тръбопровод са съединени с паров колектор. На централния пръстен е разположен и щуцер за храняваща вода.

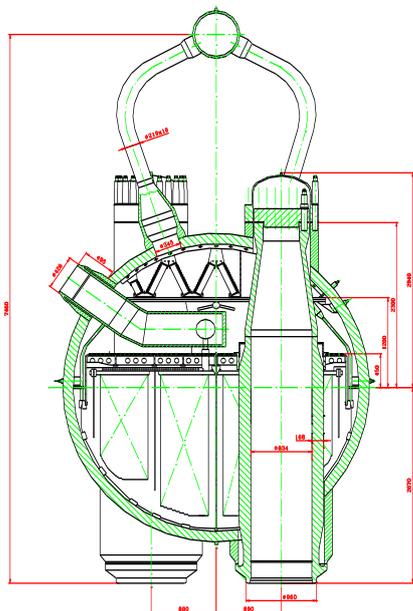


Fig. 2 Напречен разрез на корпус на парогенератор тип ПГВ 1000М

Колекторите на топлоносителя по първи контур имат еднакви устройства и представляват вертикални съдове. В долната си част тези колектори се съединяват с щуцери Ду 1200, които свързват корпуса на парогенератора и главния циркуляционен тръбопровод Ду 850, чрез който се осъществява подвеждане и отвеждане на топлоносителя, Фиг. 3.

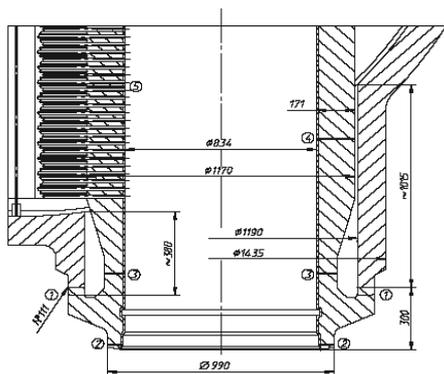


Fig. 3 Щуцер Ду 1200 на колектор на парогенератора; 1-1 – сечение, в което са фиксирани дефекти в метала, 2-2 сечение главни циркуляционни тръбопровода, 3-3 – сечение на колектора

Завареното съединение между колектора на парогенератора и щуцера Ду 1200 има сложна геометрия и наподобява „джоб“, Фиг. 4.

Обекта на изследването е метала на челни заварени съединения на щуцери Ду 1200 към колектори по първи контур на парогенератори ПГВ 1000М.

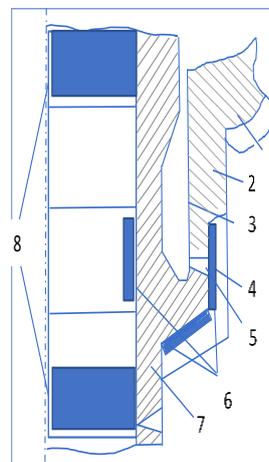


Fig. 4 Схема на възела на заваряване между колектора на ПГ и щуцера Ду 1200.

1 – корпуса на парогенератора с изолация, 2 - щуцер; 3 - „джоб“; 4 – топлоизолация; 5 – заваръчен шев; 6 – нагревателни елементи; 7 – колектор; 8 – топлоизолационни тапи.

### В. Материали и техните характеристики

Колекторите на парогенераторите са вертикални съдове, присъединени в долната си част към главни циркуляционни тръбопровода, като чрез нисковъглеродна наплавка са заварени към щуцери Ду 1200 на корпуса. От вътрешната страна на колекторите има антикорозионна наплавка.

Детайлите са изработени от ферито-перлитна стомана 10ГН2МФА. Корена на заварените съединения е изпълнен със заваръчна тел Св. 08ГСМТ, а останалата част на заварените съединения е изпълнена с електроди УОНИ 13/55 за ръчно дъгово заваряване и с тел св-08Г2С за аргоно дъгово заваряване [4,5]. Химичният състав на обектите е даден в Таблица 1.

ТАБЛИЦА 1 ХИМИЧЕН СЪСТАВ НА МАТЕРИАЛИТЕ НА ЗАВАРЕНИТЕ СЪЕДИНЕНИЯ

Елемент	Химичен състав							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Щуцер Ду 1200	0,10	0,86	0,26	0,01 3	0,01 0	0,16	2,27	0,16
Колектор	0,09	0,95	0,23	0,02	0,009	0,25	2,21	0,18
Тел Св-08ГСМТ	0,05	1,31	0,66	0,009	0,011	0,03	0,20	0,03

Механичните свойства материалите на обекта са дадени в Таблица 2.

ТАБЛИЦА 2 МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА МАТЕРИАЛА НА ЗАВАРЕНИТЕ СЪЕДИНЕНИЯ

Елемент	Механични свойства		
	Якост на опън, $R_m$ , [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	Относително удължение [A, %]	Ударна жилавост, [Kg.m /cm <sup>2</sup> ]
Щуцер Ду 1200, 10ГН2МФА	600,2/593,3	25,0/25,6	2724,4 Кс V 2459,8 Кс V 2410,8 Кс V
Колектор, 10ГН2МФА	612,9/611,0	21,6/20,6	1187,0 Кс V 931,8 Кс V 1510,8 Кс V
Тел Св-08ГСМТ, Метал на шева	446,2/440,3	-	241,2 U 179,5 U 250,1 U

### III. НАТОВАРВАЩИ ФАКТОРИ

#### A. Работни условия

Работните условия на парогенератора се определят от работата на реакторната установка в различни експлоатационни режими и състояния и са дадени в Таблица 3.

ТАБЛИЦА 3 РАБОТНИ УСЛОВИЯ НА ПАРОГЕНЕРАТОРИТЕ

Наименование на параметъра	Стойности на величините	
	Първи контур	Втори контур
Налягане от страна на топлоносителя по първи контур	15,6 МПа	-
Налягане на генерираната пара	-	6,18 МПа
Работно разчетно налягане	17,6 МПа	7,85 МПа
Налягане при хидравлични изпитания на якост	24,5 МПа	10,8 МПа
Налягане при хидравлични изпитания на плътност	17,6÷19,6 МПа	7,85÷8,6 МПа
Температура на генерираната пара	-	278,5 °C
Температура на топлоносителя на входа на парогенератора	320 °C	-
Температура на топлоносителя на изхода на парогенератора	289 °C	-
Разчетна температура	350 °C	300 °C
Температура при хидравлични изпитания	70-119 °C	70 °C

Данните за термичните и структурните напрежения се вземат от якостния анализ на колектора на парогенератора [4]. Напреженията са определени чрез поляризационно-оптичен метод, Таблица 4.

ТАБЛИЦА 4 НАПРЕЖЕНИЯ НА ВЪЗЛИТЕ НА ПАРОГЕНЕРАТОРА

Вид напрежения	Стойности на величините
Местни кръгови (огъвачи)	132,8 МПа
Местни меридионални	91,1 МПа
Общи меридионални	136,8 МПа
Общи огъвачи	117,3 МПа

Работната среда на възлите на заваряване е въздух, а на колекторите - флуида по първи контур на ядрения блок.

#### B. Механизми на деградация на механични свойства на метала

Типичните механизми на деградация на механични свойства на метала на парогенератора са [2]:

- Корозия - корозионна умора, корозионно напукване от напрежение, локална корозия, корозионно-ерозийно износване.
- Умора.
- Термично стареене – не е характерен, но е потенциален механизъм.

### IV. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

При безразрушителния контрол на заварените съединения на щуцери Ду 1200 към колектори първи контур на парогенератори ПГВ 1000М са регистрирани фиксируеми индикации, които са предимно в корена на заваръчния шев. Това е докладвано от няколко атомни централи за техните парогенератори. В една от тези централи е проведен металографски фрактографски анализ на метала в зоната на заваряване на щуцерите към паровия колектор на парогенератор. На Фиг. 5 е показан разрез на темплет на такова заварено съединение с дефекти.



Fig. 5 Разрез на темплет на вътрешна повърхност на заварено съединение с дефекти

На темплата се виждат пореста структура в зоната на заваряване на метала и няколко дефекта с дължина над 3 mm. При фрактографическите изследвания на темплата се проявяват допълнителни концентратори на напрежение във вид на подрези, корозионни каверни, гребени от груба механична обработка [6]. Изследването е проведено за парогенератор в Нововоронежката АЕЦ - Русия, а в настоящия доклад изводите са цитирани като нагледно доказателство и обяснение за дефектността в изследваните обекти.

#### A. Местоположение и вид на дефектите

В рамките на настоящето изследване са обработени получените експериментални данни от металографски изследвания на парогенератори [6]. Данните са от проведени визуален, капиларен и ултразвуков методи на безразрушителен контрол на метала. Наблюдаваните дефекти се определят като пукнатини, нарастващи от вътрешната повърхност на щуцера в метала на шева. Данните показват, че зараждането на дефекти е по вътрешната повърхност на завареното съединение и основния метал в областта на радиусния преход, Фиг. 5.

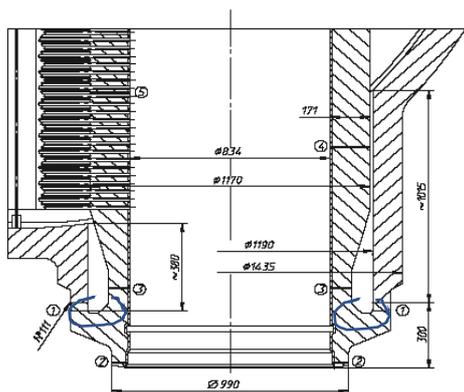


Fig. 5 Щуцер Ду 1200 на колектор на парогенератора – зона на развитие на дефектите

#### B. Механизми на деградация на механични свойства на метала

Първият стадий на зараждане на дефектите в корена на шева и в околошевната зона е вследствие на корозия под напрежение [6]. По-нататъшното развитие на дефекта на дълбочина до 2÷3 mm е по линия на радиусния преход – условно наричаме втори стадий на развитие на дефектите. Механизмите на разрушаване на метала при втория стадий са корозионно напукване под напрежение и корозионна умора на метала.

#### C. Зараждане на дефекти (инкубационен период)

Инкубационният период се определя като периода от време на експлоатация на съоръжението, за което дефекта ще се развие от микрониво до минимални детектируеми размери - около 1 mm; тази величина

зависи от чувствителността на апаратурата за изпитване.

В рамките на настоящето изследване са обработени експериментални данни от провеждания ултразвуков контрол на заварените съединения между колектори на парогенератори и щуцери Ду 1200 на главни циркуляционни тръбопроводи. Периодът на наблюдение и изследване е от около 30 години.

Констатира се, че инкубационният период заема 14 години и то в най-неблагоприятния случай, Фиг. 6. Всяка вертикална синя чертичка на Фиг. 6 обозначава един дефект, детектиран и оразмерен, като дължината му е дадена на ординатната ос.

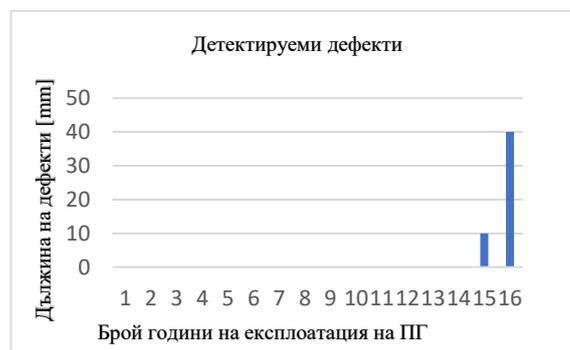
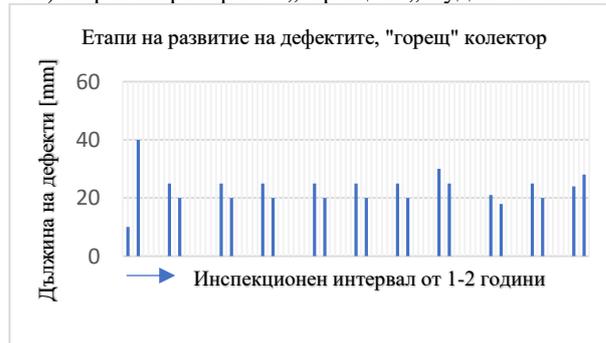


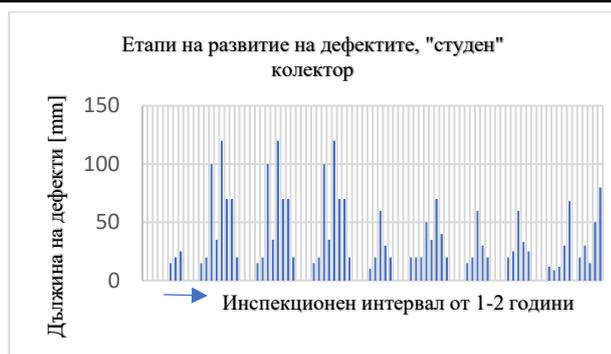
Fig. 6 Периоди на зараждане на дефекти в заварените съединения между колектори на парогенератори и щуцери Ду 1200 на главни циркуляционни тръбопроводи

#### D. Периоди на развитие на дефекти

Етапите на развитие на дефекти в заварените съединения между колектори на парогенератори и щуцери Ду 1200 на главни циркуляционни тръбопроводи са представени на Фиг. 7, съответно за два различни парогенератори от реакторни установки, тип ВВЕР 1000.

#### A) Парогенератор А – „горещ“ и „студен“ колектори





В) Парогенератор В – „горещ“ и „студен“ колектори

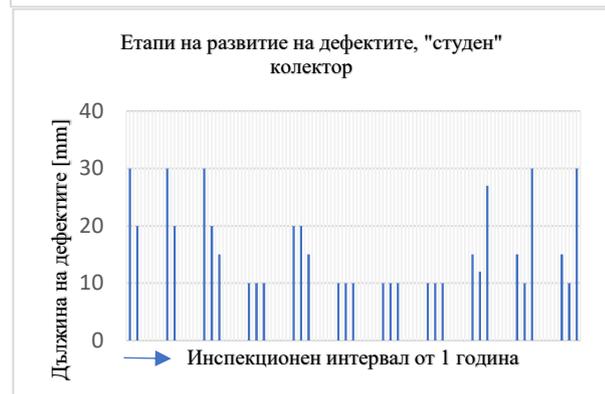
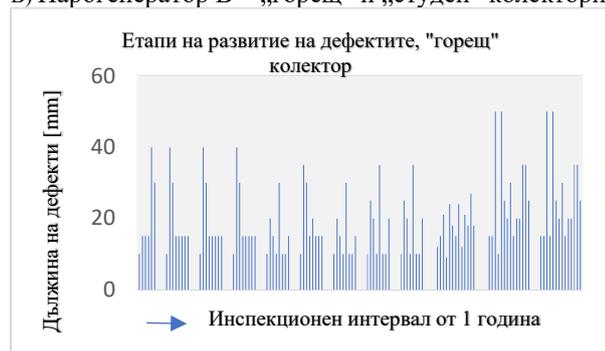


Fig. 7 Етапи на развитие на дефекти в заварените съединения между колектори на два парогенератори (А и В) и щучери Ду 1200

Получените експериментални резултати показват три възможни сценария на развитие на дефектите:

- Идеален случай е да няма констатирани дефекти въобще през годините на експлоатация на парогенератора, което се наблюдава при около една трета от броя на наблюдаваните възли.

При констатирани дефекти:

- Най-благоприятен случай е да няма развитие на дефектите във времето на експлоатация на парогенератора, Фиг. 7 А, горе.
- Най-лош случай е да има увеличаване на броя на дефектите и нарастване на тяхната дължина, Фиг. 7 В, горе. Материалът става порест и евентуално катастрофално разрушаване ще настъпи по причина на корозионно напукване под

напрежение. Нагледен пример за това е изгледа на темплета, Фиг. 5.

- Случаи на запазване броя на дефектите, но увеличаване на техния размер, Фиг. 7 В, долу. Налице е опасност от крехко разрушаване на материала. При процеса по продължаване срока на експлоатация на парогенератора е необходимо да се направи оценка на състоянието на метала по два критерия - съпротивление на материала на крехко разрушаване и съпротивление на метала на развитието на дефект.

Важно е да се отбележи, че тези случаи се наблюдават при едни и същи условия на експлоатация на парогенераторите, съответно въздействащите натоварващи фактори са равностойни.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Докладвано е в предишни публикации, че заварените съединения между колектори на парогенератори и щучери Ду 1200 на главни циркуляционни тръбопроводи представляват зони с повишен потенциал за разрушаване. Причините за това са изяснени и те са специфичната конструкция на заваръчния шев, действащите термохидравлични напрежения и корозионно агресивната работна среда [6].

В доклада са разгледани работните условия на обектите и са оценени механизмите на деградация на механични свойства. Водещ механизъм на деградация е корозионно напукване под напрежение и корозионна умора. Настоящото изследване показва зараждането и развитието на дефектите и възможните сценарии на разрушаване на заварените метални съединения.

Тази информацията е важна от гледна точка на безопасната експлоатация на съоръженията на атомните централи, както и за анализите, необходими да бъдат проведени при продължаване на сроковете на експлоатация на парогенераторите.

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.iaea.org/pris>
- [2] G. Dimova, Ageing Management Effectiveness for Nuclear Power Plant, Amazon.de, 2019
- [3] Консорциум Росатом - Русия, Electricite de France - Франция, Риск Инженеринг ООД - България, ОТЧ АТЕ.116/02-0836-2012 Отчет за резултатите от комплексното обследване на фактическото състояние и оценка на остатъчния ресурс на оборудването и тръбопроводите на реакторната установка на блок 5 на АЕЦ „Козлодуй“ в проектните граници на ОКБ „ХИДРОПРЕС“ АД.
- [4] ОКБ „ХИДРОПРЕС“ АД, 320.05.01.00 000 РР 06.1 Парогенератор ПГВ-1000М. Расчет прочности. Колектор первого контура и теплообменные трубы.
- [5] ОКБ „ХИДРОПРЕС“ АД, 320.05.01.00 000 РР 06.2 Парогенератор ПГВ-1000М. Колектор первого контура и теплообменные трубы.
- [6] С.Х.Харченко, Н.Б. Трунов, В.В.Денисов, Н.Ф.Коротаев, ФГУП ОКБ Гидропресс Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва, № 111 парогенераторов ПГВ-1000М,



[7] ЦДК.ККБР.УЗК.106-01-10/02 Квалифициране на безразрушителния контрол в "АЕЦ КОЗЛОДУЙ" ЕАД. Ултразвуков контрол на заварени съединения 111/Z на парогенератори ПГВ 1000М на реактори ВВЕР-1000.

## METALLOGRAPHICALLY RESEARCH RESULTS OF THE WELDS OF THE STEAM GENERATOR'S COLLECTORS IN NUCLEAR POWER PLANTS

Петко Кънчев  
Технически университет  
София, България  
[pmk@abv.bg](mailto:pmk@abv.bg)

Galya Dimova  
Technical University  
Sofia, Bulgaria  
[gtdimova@abv.bg](mailto:gtdimova@abv.bg)

**Abstract:** The current report presents metallographically research results of the welds of steam generator's collectors in Nuclear Power Plant. There was point the work conditions as well the mechanisms of the degradation of the mechanical properties of the metals. The results describe investigations on the formation as well growth of the defects. The period of research observation takes 30 years.